

関連観測データをフル活用した2011年東北地方太平洋沖震の津波断層モデルの再検討

著者	根本 信
号	63
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5641号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00127639

氏 名	ね も と ま こ と 根 本 信
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 3 1 年 3 月 2 7 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	関連観測データをフル活用した 2011 年東北地方太平洋沖地震の 津波断層モデルの再検討
指 導 教 員	東北大学教授 今村 文彦
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 今村 文彦 東北大学教授 寺田 賢二郎 東北大学教授 越村 俊一

論 文 内 容 要 旨

2011 年 3 月 11 日に発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では, 地震に伴って発生した津波が太平洋沿岸の各地に襲来し, 多数の犠牲者を生じた. 津波の高さは青森県南部から茨城県北部にかけて特に高く, そのなかでも岩手県, 宮城県および福島県では 20 m を超える津波痕跡高が観測された. このような津波を説明する断層モデルは地震直後から精力的に研究が進められており, 多数の断層モデルが提案されている. しかし, 先行研究の各断層モデルはその断層すべり量分布が互いに異なっており, どのような断層すべりが起きたのかは未だ明らかではない. また, 津波に関連する観測データを全て説明できる断層モデルは提案されていない. 一方で, 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生から年月が経つにつれて, この地震の隣接領域で今後地震が発生することが懸念されている. 2011 年東北地方太平洋沖地震によって断層すべりが生じた領域を推定することは, その周辺で応力が解放されていない領域を推定することにつながるため, 隣接領域に想定される地震の震源域を検討する上で重要な情報となる. また, 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波がどのような過程で発生したかを明らかにすることは, 今後発生しうる最大クラスの巨大地震・津波の断層モデルを検討する上で重要な知見となる. そこで, 本研究では 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波を発生させた断層すべり域や断層すべりの特徴を明らかにすることを目的として, 同地震で観測された津波関連データをフル活用して断層モデルの構築を行った.

解析には, 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波に関連するデータとして測地観測データ (地殻変動量の最終変位量), 動的地殻変動データ (GNSS 連続観測データ), 沖合津波波形データおよび津波痕跡高データを使用した. このうち, 測地観測データおよび動的地殻変動データは, 津波を発生させた断層すべりに直接関係する観測データである. 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルに関する先行研究では, 測地観測データは多くの研究で用いられているが, 動的地殻変動データを用いた研究は行われておらず, 本研究で初めて使用した. 沖合での津波の挙動を示す沖合津波観測データとしては, 東北大学, 東京大学, 港湾空港研究所, JAMSTEC, 気象庁および NOAA による観測データをフル活用した. そのうち, 東北大学の 5 観測点の海底水圧計データは本研究

で初めて用いたデータである。津波痕跡高データは、「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による津波痕跡高データから、防潮堤等の施設の堤外側で観測された信頼度の高いデータを抽出し、隣接するデータを平均化する処理を行って解析に使用した。

断層すべりを与える断層面は先行研究でも様々な形状が用いられているが、推定される断層すべり量は断層面の形状に依存するため、適切な断層面を用いる必要がある。本研究では、海底音波探査等に基づいて作成された横田ほか(2017)の曲面的なプレートモデルを断層面として用いた。曲面的なプレート面での地殻変動量の計算は多くの先行研究で有限要素法によって行われているが、モデル設定や計算にかかるコストが大きい。それに対して、本研究では、断層面を微小断層で表現した上で、微小断層の計算上の深さを変化させる工夫を行うことにより、従来の半無限均質媒質を仮定した地殻変動計算手法をそのまま用いて、簡易に計算する工夫を行った。

本研究では、インバージョン解析によって断層すべり量の推定を行ったが、解析領域を空間方向に 176 セグメント（走向方向 22×傾斜方向 8）に分割した上で、それを時間方向に 10 分割して **multiple time-window** モデルとした。インバージョン解析の観測方程式には、先行研究に従って空間方向および時間方向の平滑化行列を導入し、それぞれの平滑の強さは ABIC が最小になるように決定した。各観測データに対応するグリーン関数は数値シミュレーションによって求めた。津波痕跡高データのグリーン関数を適切に求めるためには細かい格子で計算を行う必要があり多大な計算量となるが、本研究では細かい格子と粗い格子の数値計算と組み合わせることでこの点を克服した。

インバージョン解析では、まず津波痕跡高データを除いたデータセットで線形インバージョン解析を行い、次に線形インバージョン解析の結果を初期モデルとして津波痕跡高データを加えたデータセットで非線形インバージョンを行った。このように 2 段階の解析を行うことにより、使用した全ての観測データを再現できる津波断層

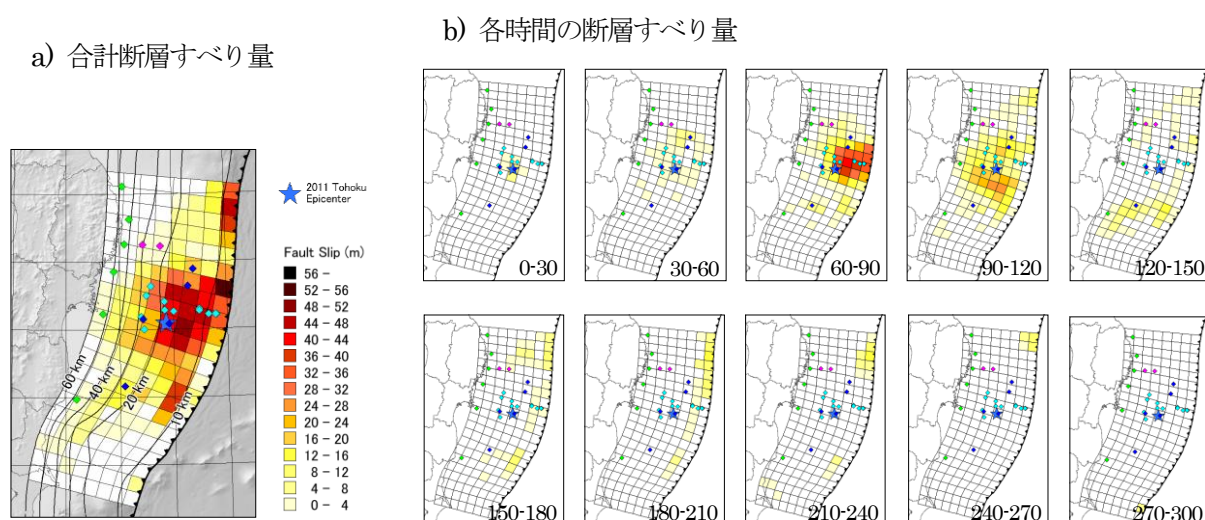
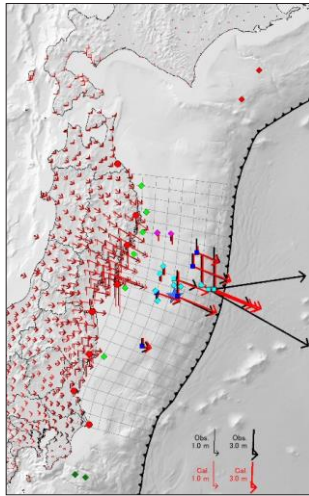
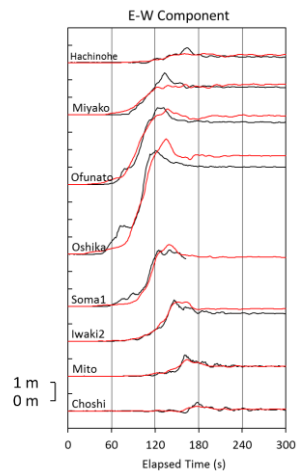


図1 本研究のインバージョン解析により得られた断層モデル

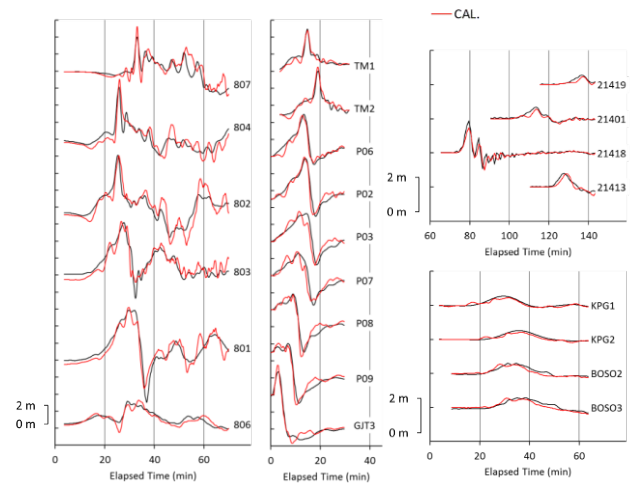
a) 静的地殻変動量



b) 動的地殻変動量



c) 沖合津波波形



d) 津波痕跡高

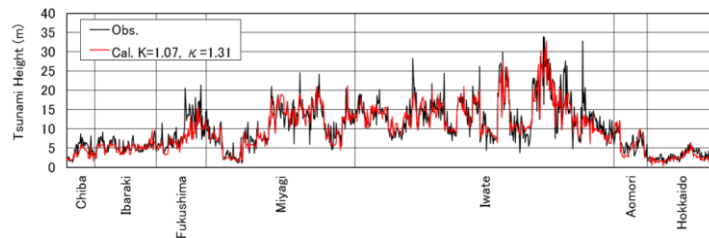


図2 解析に使用した各観測データ(黒線)と本研究で得られた断層モデルによる計算値(赤線)の比較

モデルを得ることに成功した。図1に得られた断層すべり量分布を、図2に解析に使用した各観測データと本研究で得られた断層モデルによる計算値の比較を示す。図2に示すように、本研究で得られた断層モデルは観測データをよく説明できている。得られた断層モデルは、地震発生後1分～1分半に宮城県沖で約40～50mの急激な断層すべりを生じるとともに、地震発生後2～4分に岩手県沖の海溝軸に沿ってゆっくりとした断層すべりを示している。前者の断層すべりは、地震動解析に基づく先行研究の断層モデルと良く整合する。一方、後者の断層すべりは津波地震的な断層すべりであり、先行研究でもその存在は指摘されているが(例えば, Satake et al. (2013)), 本研究によって両者がより明確に分離された。これは、時定数が短い動的地殻変動データをインバージョン解析に使用したことによる成果である。

本研究で得られた断層モデルは、岩手県沖の海溝軸に沿って断層すべりが北緯40度付近まで延びている点が特徴的である。この妥当性を釧路沖海底津波計の到達時間を用いた逆伝播図により評価し、波源域の北限が北緯40度付近であることを明らかにした。この結果は本研究で得られた津波断層モデルと調和的である。また、宮城県沖の海溝軸付近では地震前後の海底基地局の位置変化が観測され(Ito et al. (2011)), 岩手県沖および宮城県沖の海溝軸付近では地震前後の測深データの比較に基づいて鉛直変化量が推定されている(Fujiwara et al. (2011) および Fujiwara et al. (2017))。これらは観測誤差や推定誤差が大きいものの、本研究で得られた断層モデルか

ら期待される変動量と比較した結果、対応関係があることが確認された。更に、本研究で得られた津波断層モデルによって、三陸沿岸で観測された地震発生直後の水位変動をよく再現出来ることを示した。これは、動的地殻変動データをインバージョン解析に用いたことによって、沿岸域の時間変動を正確にモデル化できたことを意味している。以上の検討結果はいずれも本研究で得られた断層モデルの妥当性を示すものである。

本研究で2011年東北地方太平洋沖地震のインバージョン解析に用いた沖合津波観測点は23点である。しかし、現在では防災科学技術研究所によって S-net（日本海溝海底地震津波観測網）が整備され、千島海溝および日本海溝に敷設された合計150点のケーブル式海底水圧計によってリアルタイムに津波を観測できる態勢が整っている。この観測データが得られた場合に、津波の即時予測がどの程度可能となるか2011年東北地方太平洋沖地震を擬似的な観測データとして評価した。その結果、地震発生から10分間の観測データを使用することで沿岸の津波高さをおおむね予測できるものの、沿岸の津波高さを正しく予測するためには、断層すべりの時間発展を考慮した波源推定を行う必要があることが明らかとなった。この点は、今後の津波即時予測を行う上で重要な知見である。

また、本研究では2011年東北地方太平洋沖地震で観測された多くのデータを用いて断層モデルの推定を行った。一方、今後発生する地震や津波を想定するためには、過去に起きた津波の断層モデルを推定することが重要だが、多くの既往津波では観測機器によるデータは得られておらず、古文書等に基づく津波痕跡高データから断層モデルを推定する必要がある。そこで、津波断層モデルの推定に用いる観測データとして津波痕跡高データしか使用できない場合に、非線形インバージョン手法によって断層モデルの推定がどの程度可能か検討した。観測データとして2011年東北地方太平洋沖地震の津波痕跡高データのみを用いて非線形インバージョンを行った結果、空間平滑パラメータの条件を変えて段階的な解析を行うことにより津波痕跡高データを良く再現する津波断層モデルが得られることを示した（図3）。しかし、得られた津波断層モデルは全ての観測データを用いて推定し

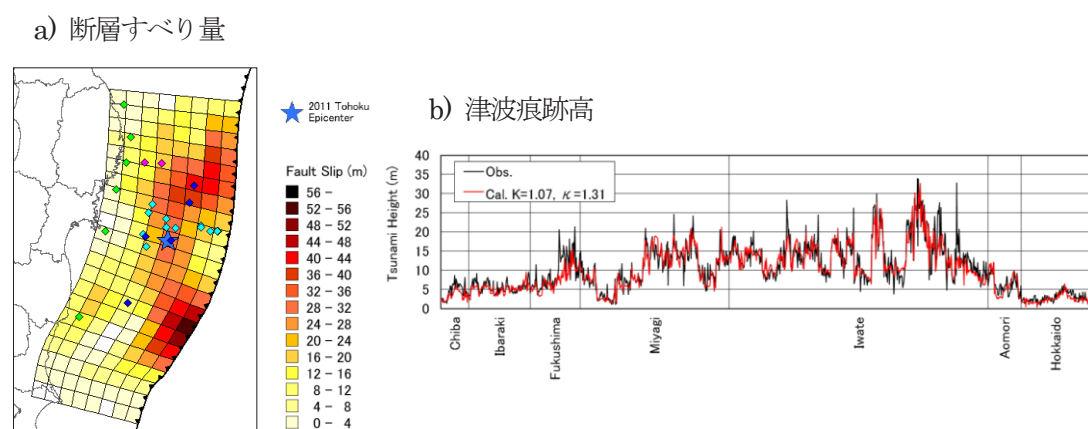


図3 津波痕跡高データを観測データとしたインバージョン結果
a) 断層すべり量分布, b) 観測値(黒線)と計算値(赤線)の比較

た津波断層モデル（図 1）とは断層すべり分布に相違があり，断層のすべり域やマグニチュードが大きめに推定される傾向があることがわかった．この知見は今後の歴史地震の検討を行う上で重要である．

論文審査結果の要旨

2011年東北地方太平洋沖地震の津波を説明する断層モデルとしては、これまでに多くのモデルが提案されているが、これらのモデルでは一部の観測データは説明できるものの、動的な地殻変動量データや沿岸の津波痕跡高分布を含めて総合的に評価されていない。本研究では、津波に関連した観測データである沖合津波波形データ、陸域・海域測地データ、動的な地殻変動量データおよび津波痕跡高データを用いて、これらを全て説明する津波断層モデルをインバージョン解析により構築した。

第1章は序論である。

第2章では、解析に用いる観測データとその処理について述べた。沖合津波波形データには、先行研究でも使用されているデータに加えて海底水圧計データ5点を本研究で初めて使用した。

第3章では、解析の方法について述べた。断層すべり面として現実的なプレートモデルを用いるため地殻変動量の計算方法に工夫を行った。また、グリーン関数を適切に求めるためには細かい格子で数値計算を行う必要があり多大な計算量となるが、本研究では粗い格子の数値計算と組み合わせることでこの困難を克服した。

第4章ではインバージョン解析結果を示した。まず津波痕跡高データを除いたデータセットで線形インバージョン解析および非線形インバージョン解析を実施した。この2段階の解析手順によって、全ての関連観測データを説明する津波断層モデルを得ることに成功した。得られた断層モデルは、時空間的に複雑な発生過程を示し、特に岩手県沖の断層すべりは先行研究でも指摘されていたが定量的に推定することが出来た。

第5章では、本研究のインバージョン手法の即時予測への適用性を検討した。その結果、現在のS-net観測網を用いると地震発生から10分間の観測データを用いて沿岸の津波高さを予測できること、沿岸の津波高さを適切に予測するためには断層すべりの時間発展を考慮したインバージョンを行う必要があることを示した。

以上の成果により、線形と非線形のインバージョン解析を融合させることにより2011年東北地方太平洋沖地震の津波を説明する断層モデルを改良でき、その結果、新たな超大すべり域の可能性を示したと言える。今後、同様な規模を持つ津波リスク評価に対して有益な情報であり、信頼性の向上に大きく寄与できるものと期待できる。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。